

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-303713

(P2002-303713A)

(43) 公開日 平成14年10月18日 (2002. 10. 18)

(51) Int.Cl.⁷

識別記号

F I

テマコード* (参考)

G 0 2 B 5/18

G 0 2 B 5/18

2 H 0 4 7

1/02

1/02

2 H 0 4 9

5/30

5/30

6/12

6/12

F

N

審査請求 未請求 請求項の数15 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号

特願2001-108475(P2001-108475)

(22) 出願日

平成13年4月6日 (2001. 4. 6)

(71) 出願人 000004008

日本板硝子株式会社

大阪府大阪市中央区北浜四丁目7番28号

(72) 発明者 橋高 重雄

大阪府大阪市中央区北浜4丁目7番28号

日本板硝子株式会社内

(72) 発明者 奈良 正俊

大阪府大阪市中央区北浜4丁目7番28号

日本板硝子株式会社内

(74) 代理人 100069084

弁理士 大野 精市

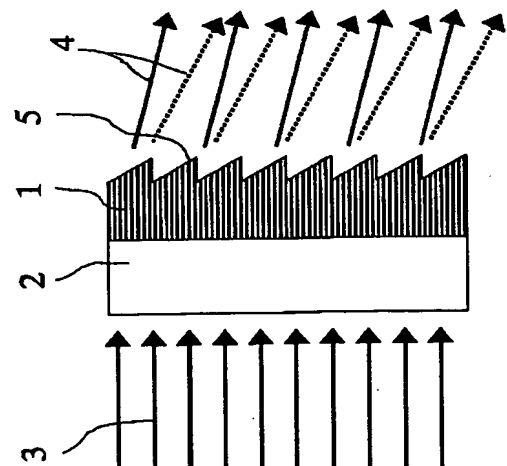
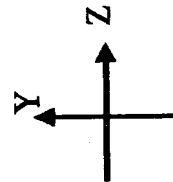
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光学素子

(57) 【要約】

【課題】分光素子として用いられる回折格子からの出射角の波長依存性は小さく、回折格子を使用した光分波器の性能を向上させるためには装置を大型化せざるを得ないという問題点があった。

【解決手段】本発明においては、2つまたは3つの異なる方向に周期的繰り返し構造を有する2次元または3次元フォトニック結晶を用いた光学素子を提供する。この光学素子のフォトニック結晶はプリズム構造、もしくはブレース状回折格子構造に加工する。



BEST AVAILABLE COPY

【特許請求の範囲】

【請求項1】2つの異なる方向に周期的繰り返し構造を有する2次元フォトニック結晶構造により構成され、前記周期的繰り返し構造部分が2方向ともに露出する第1の端面を光入射面、前記周期的繰り返し構造部分が2方向ともに露出する第2の端面を光出射面とし、かつ前記光入射面に対して前記光出射面の少なくとも一部が一定の傾斜角を有していることを特徴とする光学素子。

【請求項2】2つの異なる方向に周期的繰り返し構造を有する2次元フォトニック結晶構造により構成され、前記周期的繰り返し構造部分が1方向のみ露出する第1の端面を光入射面、前記光入射面と相対する端面を光出射面とし、かつ前記光入射面に対して前記光出射面の少なくとも一部が一定の傾斜角を有していることを特徴とする光学素子。

【請求項3】3つの異なる方向に周期的繰り返し構造を有する3次元フォトニック結晶構造により構成され、前記周期的繰り返し構造部分が2方向に露出する第1の端面を光入射面、前記光入射面と相対する端面を光出射面とし、かつ前記光入射面に対して前記光出射面の少なくとも一部が一定の傾斜角を有していることを特徴とする光学素子。

【請求項4】前記光入射面と光出射面がそれぞれ平面であることを特徴とする請求項1ないし3に記載の波長多重光記録ヘッド。

【請求項5】前記光入射面もしくは光出射面が周期的繰り返し凹凸構造を有することを特徴とする請求項1ないし3に記載の波長多重光記録ヘッド。

【請求項6】2つの異なる方向に周期的繰り返し構造を有する2次元フォトニック結晶構造により構成され、前記周期的繰り返し構造部分が2方向ともに露出する第1の端面を光入射面、前記周期的繰り返し構造部分が2方向ともに露出する第2の端面を光出射面とし、かつ前記周期的繰り返し構造のうち少なくとも片方が、大小2種類の繰り返し周期から構成されることを特徴とする光学素子。

【請求項7】2つの異なる方向に周期的繰り返し構造を有する2次元フォトニック結晶構造により構成され、前記周期的繰り返し構造部分が1方向のみ露出する第1の端面を光入射面、前記光入射面と相対する端面を光出射面とし、かつ光入射面に露出する周期的繰り返し構造が、大小2種類の繰り返し周期から構成されることを特徴とする光学素子。

【請求項8】3つの異なる方向に周期的繰り返し構造を有する3次元フォトニック結晶構造により構成され、前記周期的繰り返し構造部分が2方向に露出する第1の端面を光入射面、前記周期的繰り返し構造部分が2方向に露出する第2の端面を光出射面とし、かつ光入射面に露出する前記周期的繰り返し構造のうち少なくとも片方が、大小2種類の繰り返し周期から構成されることを特

徴とする光学素子。

【請求項9】前記光入射面における周期的繰り返し構造が、前記光入射面の法線を軸とする90°回転対称性を有することを特徴とする請求項1ないし3に記載の光学素子。

【請求項10】前記周期的多層構造体に、光の伝播する方向での使用波長域に対応する結合性フォトニックバンドの波数ベクトルが存在し、かつ前記結合性フォトニックバンドは最低次のものではないことを特徴とする請求項1ないし3、または請求項6ないし8に記載の光学素子。

【請求項11】請求項10に記載の光学素子において、光の伝播する方向での使用波長域に対応する結合性フォトニックバンドの波数ベクトルが1種類のみ存在し、かつ前記結合性フォトニックバンドは最低次のものではないことを特徴とする光学素子。

【請求項12】請求項2または7に記載の光学素子において、光の伝播する方向での使用波長域に対応する結合性フォトニックバンドが、最低次のバンドのみであることを特徴とする光学素子。

【請求項13】前記周期的繰り返し構造が、屈折率の異なる3種類の材料により構成されることを特徴とする請求項1ないし3、または請求項6ないし8に記載の光学素子。

【請求項14】前記周期的繰り返し構造に接する媒体が、空気もしくは真空であることを特徴とする請求項1ないし3、または請求項6ないし8に記載の光学素子。

【請求項15】請求項1ないし14に記載の光学素子において、光入射面と光出射面を入れかえることを特徴とする光学素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、波長の異なる光を分離する分光光学素子、あるいは偏光方向の異なる光を分離する偏光分離光学素子に関するもので、とくに2次元または3次元フォトニック結晶を用いたこれらの光学素子に関する。

【0002】

【従来の技術】近年、インターネットの急速な普及により、光ファイバー通信網の容量の増大が強く求められており、その手段としてWDM（波長多重）通信の開発が急速に進められている。WDM通信においては、わずかな波長差の光が個別の情報を伝達することから、波長選択性の良い光分波器、フィルタ、アイソレータといった光学機能素子が必要である。上記機能素子においては、量産性、小型化、集積化、安定性などが強く求められていることは言うまでもない。

【0003】波長多重光通信のように人為的に複数の波長が多重化された光信号を分波・検出する目的や、分光測定のように被測定光のスペクトル解析等の目的に分光

波器（または分光器）が用いられる。この光分波器には、プリズム、波長フィルタ、回折格子等の分光素子が必要とされる。とくに回折格子は代表的な分光素子であり、石英やシリコン基板などの表面に周期的な微細凹凸構造を形成したものが用いられている。その周期的凹凸構造によって発生する回折光が互いに干渉し、ある特定波長の光が特定の方向に出射される。この特性が分波素子として利用されている。

【0004】回折格子を用いた分光光学系の一例を図19に示す。光ファイバ21から出射した波長多重化された光線30はコリメータレンズ22で平行光31となり回折格子23に入射される。この光は回折格子23で分波され、波長ごとに異なった出射角をもって出射される。この出射光32は再びコリメータレンズ22を通過し、受光面24上に集光スポット群40を形成する。この各集光スポットの位置に受光手段としてフォトダイオードなどの光検出器、あるいは光ファイバの端面を設置すれば、所定の波長毎に分離した信号出力を得ることができる。また、回折格子に入射する光が連続スペクトルをもっていれば、受光面に設置する受光手段の間隔に応じてスペクトルの離散化した出力が得られる。

【0005】反射回折格子の場合、回折格子の回折次数を m 、格子定数を d 、使用波長を λ とし、回折格子を形成した面の法線と入射光線（光ファイバの光軸5）のなす角を θ_i 、出射光線のなす角を θ_o とすると、次式が成り立つ。

$$\sin \theta_i + \sin \theta_o = m \lambda / d$$

θ_i を一定とし、波長が $\Delta \lambda$ だけ変化すると、回折格子から距離 L だけ離れた受光面上に到達する光線の位置の変化 Δx は、

$$\Delta x = (L m / (d \cdot \cos \theta_o)) \cdot \Delta \lambda$$

で与えられる。したがって波長間隔に応じて式から計算される位置間隔で受光手段を受光面上に配列しておけば、各波長ごとに分離した信号が得られる。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、回折格子からの出射角の波長依存性は小さい。例えば、光通信で用いられる波長1.55 μm 帯で波長間隔0.8nm（周波数間隔100GHzに相当）の光を分波する場合を考える。回折次数 $m=25$ 次とし、入射角 $\theta_i=71.5^\circ$ 、出射角 $\theta_o=38.5^\circ$ とすると、回折格子の格子定数 d は24.7 μm となる。この系で上記波長間隔0.8nmに対して得られる出射角の変化は約0.06°に過ぎず、50 μm 間隔で配列した受光素子でこれを分離して受光するためには $L=48\text{mm}$ の距離が必要となる。

【0007】すなわち、受光面上の光スポットの位置変化 Δx は受光手段が一定の大きさをもつため、通常数10 μm 以上とする必要がある。回折格子の定数である m 、 d は大きくは変えられないため、小さい波長変化 Δ

λ に対して必要な Δx を得るためには距離 L を大きくする必要があり、回折格子を使用した光分波器の性能を向上させるためには装置を大型化せざるを得ないという問題点があった。

【0008】また、回折角度には偏光方向による差がないので、通常回折格子によって角度による偏光分離を行なうことはできない。したがって、光システムにおいて偏光分離機能が必要とされる場合は、回折格子とは別に偏光分離素子が必要になることもある。

10 【0009】本発明の目的は、このような問題点を解決するため、従来の回折格子よりも大きい波長分散特性を有する光学素子を提供することにある。また、本発明の他の目的は、波長分散と同時に、角度による偏光分離の機能を備えた光学素子を提供することにある。

【0010】

【課題を解決するための手段】上記の課題を解決するため、本発明の光学素子は、2つまたは3つの異なる方向に周期的繰り返し構造を有する2次元または3次元フォトリソニック結晶を用いる。

20 【0011】その第1の態様では、2次元フォトリソニック結晶において周期的繰り返し構造部分が2方向ともに露出する第1の端面を光入射面、周期的繰り返し構造部分が2方向ともに露出する第2の端面を光出射面とする。

【0012】第2の態様では、2次元フォトリソニック結晶において周期的繰り返し構造部分が1方向のみ露出する第1の端面を光入射面、この光入射面と相対する端面を光出射面とする。

30 【0013】第3の態様では、3次元フォトリソニック結晶において周期的繰り返し構造部分が2方向に露出する第1の端面を光入射面、この光入射面と相対する端面を光出射面とする。

【0014】上記3つの態様の光学素子は、いずれもその光入射面に対して光出射面の少なくとも一部が一定の傾斜角を有していることが望ましい。その際、光入射面と光出射面がそれぞれ平面である、いわゆるプリズム構造であっても、光入射面もしくは光出射面が周期的繰り返し凹凸構造を有する回折格子であってもよい。

40 【0015】さらに上記3つの態様において、光入射面に対して光出射面が傾斜角を有する替わりに、光入射面に露出する周期的繰り返し構造が、大小2種類の繰り返し周期から構成されるようにしてもよい。

【0016】上記各態様の光学素子を分光素子として使用する場合には、周期的多層構造体に、光の伝播する方向での使用波長域に対応する結合性フォトリソニックバンドが存在し、かつそれら結合性フォトリソニックバンドは最低次のものではないことが好ましい。

50 【0017】その際、この分光素子が偏光依存性をもたないためには、上記第1または第3の態様の光学素子を用いるのがとくに望ましく、光入射面もしくは光出射面における周期的繰り返し構造が、光入射面もしくは光出

射面の法線を軸とする 90° 回転対称性を有することが望ましい。

【0018】さらに第1、第3の態様の光学素子において、光の伝播する方向での使用波長域に対応する結合性フォトニックバンドの波数ベクトルが1種類のみ存在し、かつその結合性フォトニックバンドは最低次のものではないことが望ましい。

【0019】本発明の光学素子を偏光分離素子として使用する場合には、上記第2の態様を使用するのが望ましく、かつ光の伝播する方向での使用波長域に対応する結合性フォトニックバンドが、最低次のバンドのみであることが望ましい。

【0020】上記いずれの周期的繰り返し構造も、屈折率の異なる3種類の材料により構成されることが好ましく、またこれらの構造に接する媒体は、空気もしくは真空であることが好ましい。なお、各光学素子の光入射面と光出射面は入れ替えて構成してもよい。

【0021】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態について具体的に説明する。光の波長程度もしくはそれ以下の厚さの薄膜から構成される周期的多層膜は、1次元フォトニック結晶としてフォトニックバンドギャップを有することから、高反射膜、偏光分離フィルタ、波長選択性フィルタなどの光学素子として既に実用化しており、広く用いられている。

【0022】本発明では、周期的繰り返し構造が2方向あるいは3方向に存在する2次元または3次元フォトニック結晶構造を利用することにより、1次元フォトニック結晶では実現が困難な性能を提供する。はじめに本発明の基礎となる1次元フォトニック結晶を用いた光学素子について説明する。

【0023】図1は本発明の基礎となる「1次元端面入射構造」を模式的に示した図である。平面基板2の片側表面に、基板表面と平行な方向(Y方向)に周期を有する多層構造体1を形成し、その表面に回折格子の機能を有する鋸歯状繰り返し凹凸(ブレース)構造5を形成する。基板側から、基板表面と垂直な入射光3を送り込み、屈折もしくは回折による出射光4を取り出す。図1の構造とすると、ガラスなど均質な物質に設けたブレース回折格子よりはるかに大きい波長分散を得ることができる。

【0024】上記現象の原理について簡単に説明する。図2は、無限に広がる多層構造体の模式図であり、厚さ t_A の物質A (屈折率、 n_A) と厚さ t_B の物質B (屈折率、 n_B) を交互に積み重ねた周期 $a = (t_A + t_B)$ の構造である。このような多層構造体は1次元のフォトニック結晶とみなすことができ、フォトニック結晶の理論によりフォトニックバンド図を計算により求めることができる。計算の方法は、“Photonic Crystals”, Princeton University Press (1995) あるいは、Physical Revi

ew B 44巻、16号、p.8565、1991年、などに詳しい。

【0025】周期的多層膜のバンド図の範囲は図2のY方向(周期方向)には限定されるが、XおよびZ方向(平面の広がる方向)には無限に広がっている。図3と図4は、

屈折率1.44の層(厚さ0.5a)

屈折率2.18の層(厚さ0.5a)

の層を交互に重ねた周期aの多層膜についての、平面波法によるバンド計算の結果を、TE偏光とTH偏光のそれぞれ下から3番目までについて示したものである。

【0026】ここで、TH偏光は磁場の向きがX軸方向である偏光を、TE偏光は電場の向きがX軸方向である偏光をそれぞれ表わす。なお、図3、図4の各曲線に対して示した数字は、

規格化周波数 $\omega a / 2\pi c$

である。ここで、 ω は入射する光の角振動数、aは構造の周期、cは真空中での光速である。規格化周波数は、真空中の入射光波長 λ_0 を用いて、 a/λ_0 とも表わすことができるので、以下では a/λ_0 と記述する。図3と図4は、逆空間における1周期を表わすブリルアンゾーンであり、縦はY軸方向で上下の境界線は中心から $\pm\pi/a$ の範囲を表わす。横はZ軸方向(X軸方向でも同じ)であり、周期性がない方向なので境界線は存在せず、図の両端は計算の範囲を示す便宜的なものである。ブリルアンゾーン内での位置は多層構造内での波数ベクトルを、曲線は入射光の波長 λ_0 (真空中)に対応するバンドをそれぞれ意味する。

【0027】ここで、図2の構造においてXY平面を断面として、この断面からZ軸方向に平面波(TE偏光またはTH偏光)を垂直入射させる場合について、フォトニック結晶内の伝播光について考える。

【0028】図3、4の各バンド図において、原点からZ軸方向への a/λ_0 値の変化を示したのが図5(TE偏光)及び図6(TH偏光)である。図5に示すように、入射光の真空中の波長が λ_A の場合、フォトニック結晶内では第1バンドに対応する波数ベクトル k_{A1} が存在する。換言すると、周期 $\lambda_{A1} = 2\pi/k_{A1}$ の波動としてフォトニック結晶内をZ軸方向に伝播する(以下、第1バンド光とする)。

【0029】ところが、入射光の真空中の波長が λ_B の場合には、第1、第3バンドに対応する波数ベクトル k_{B1} 、 k_{B3} が存在する。ここで、第2バンドは「非結合性」であるため無視する。従って、周期 $\lambda_{B1} = 2\pi/k_{B1}$ の第1バンド光、および $\lambda_{B3} = 2\pi/k_{B3}$ の波動(以下、第3バンド光とする)がそれぞれフォトニック結晶内をZ軸方向に伝播する。

【0030】ここで、真空中での周期(λ_A 、 λ_B など)を、対応するフォトニック結晶中の周期(λ_{A1} 、 λ_{B3} など)で除した数値を「実効屈折率」と定義する。図5から理解できるように、第1バンド光の a/λ_0 とkはほ

ば比例するため、実効屈折率も n_0 によりほとんど変化しない。しかし、第3バンド光は実効屈折率が n_0 により大きく変化する。

【0031】したがって、多層構造体1すなわちフォトニック結晶を図7に示すように入射面と出射面が平行でなく一定の傾斜角をもったプリズム状に加工し、複数の波長を含む平行光線を入射光3として多層構造の層面と平行でない入射面1bに入射させると（基板は図示を省略する）、入射面1bに対して傾斜した出射面1aから出射する第1バンド光は通常の均質媒体と同程度の波長分散しか示さない。これに対して、第3バンド光は非常に大きい分散を示すため、分散素子として利用することができる。これは、いわゆるスーパープリズム効果の一種である。スーパープリズム効果は、以下の文献等で提唱されている。

Physical Review B, 58巻、16号、p.R10096、1998年

【0032】図7のプリズム形状では、フォトニック結晶構造体のZ軸方向の厚みを大きくしなければならぬ点が製作上の問題となる。そこで、図8に示すように出射面1cをブレース構造5とすれば厚みを大幅に減らすことができる。ブレース構造の回折についてはよく知られており、ブレースの周期と深さを最適化設計すれば、特定の次数の回折光効率を100%に近いものとすることができる。ただし、スーパープリズム効果による分散は非常に大きいので、0次回折光に合わせたブレース形状としてもよい。なお、この場合も第1バンド光は存在するが、図示は省略している（以下同様）。

【0033】また、図2の多層構造はX軸方向とY軸方向の構造に大きな違いがあるため、偏光方向による特性の違いが現われる。そのために、TE偏光とTH偏光のバンド図（図5、6）を比べると、すべてのバンドで異なっており、特に第1バンドは差が大きい。そこで、第1バンドは偏光分離に役立てることができる。たとえば、図5、図6の $a/\lambda A$ に相当するTE、およびTHの入射光は、大きく角度の異なる出射光となる。この場合は第3バンド光が存在しないので、入射光の利用効率を大きくすることができる。なお、図6においては第2バンドと第3バンドの交叉（偶然の縮退）があるので、図4における2番目、3番目の結果とは一致していない。

【0034】図8のブレース構造のかわりに、Y軸方向の周期を、小周期と大周期の二重構造としても良い。一例を図9に示す。この例では小周期 P_0 は2種類の物質A、Bの積層繰り返しの周期である。大周期 P_L の1周期の範囲内では物質Aの膜厚がY軸方向に一定の割合で増加し、物質Bの膜厚が同じ割合で減少している。このためY軸方向に平均屈折率が傾斜し、フォトニック結晶内での波動周期が連続的に変化して、波面に傾きが生じる。これが大周期 P_L をもって繰り返すため、光出射側表面の波面も鋸歯状となるので、結果としてブレース状

の凹凸形状と同等の光学的効果が生じる。

【0035】[第1の実施形態]上述した1次元端面入射構造では、入射面でのX方向とY方向で構造が大きく異なるために、TE偏光とTH偏光での違いが現われる。そこで、XY平面における構造に、光の入射方向であるZ軸の周りに90°回転対称性を持たせれば、偏光方向による差をなくすることができる。このような対称性は例えばつぎのような構造により実現できる。

【0036】図10は、屈折率がそれぞれ n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 である4種類の物質A、B、C、Dからなるフォトニック結晶の模式図である。各物質はそれぞれXY平面を底面とする角柱状であり、物質Cは底面が正方形の四角柱である。いずれもZ軸方向には構造をもたない。端面の一部の拡大図に示されるように、XY断面が正方形の物質CのX方向の両隣には物質Dが、またY方向の両隣には物質Aがそれぞれ辺を接して配列されている。物質Bは物質Cとは辺を接しない位置を占める。もちろん、X方向の周期 a_x とY方向の周期 a_y は等しい。このとき、 $n_1 = n_4$ であればZ軸周りの90°回転対称性が実現するので、物質AとDを同一物質とすればよい。この90°回転対称パターンは一例であってこれに限定はされない。90°回転対称パターンの一般的な例を図11に示す。

【0037】分光素子としては、図7の「1次元端面入射構造」と同様の構造をとり、XY平面と平行な一端面からZ方向に平行光を入射させる。屈折光は裏面側を出射面として得られるが、1次元の場合と同様に入射端面と出射端面が平行でないようにプリズム型に加工すると大きな波長分散効果が得られる。図8のようにこれをブレース状に加工してもよい。この構造の分光素子は偏光依存性がなく、偏光が混在する光ファイバ伝搬光などを偏光に関係なく分光するために好適である。

【0038】[第2の実施形態]1次元端面入射構造は比較的単純な多層構造なので製作しやすいという利点がある。ところが、図5、図6から明らかなように、第3バンド光が発生する条件では第1バンド光も存在する。従って、分散の大きい第3バンド光を分光素子として利用しようとする場合、入射光に対する第3バンド光の割合、すなわち光量の利用効率が低くなるという問題が生じる。この問題に対しては、Z軸方向に周期性を導入して第3バンド光の割合を大きくすることが考えられる。

【0039】Y方向とZ方向に周期構造を有する2次元フォトニック結晶構造の一例を、図12に示す。この構造は、図10に示した構造をY軸の周りに90°回転した場合に相当するが、各物質のYZ断面の1周期単位は正方形である必要はなく、Y方向の周期 a_y とZ方向の周期 a_z が等しい必要はない。たとえば図12の構造において、

$$n_1 = 1.44$$

$$n_2 = 2.18$$

$n_3 = 1.00$
 $n_4 = 1.00$
 $a_y = 1$
 $a_z = 0.5$
 $t_y = 0.5$
 $t_z = 0.5$

とした場合、XY平面に平行な端面からZ軸方向に平面波(TE偏光)を垂直入射させる場合、すなわち「1次元端面入射2次元構造」について、フォトニック結晶内の伝播光について考える。

【0040】ブリルアンゾーンの原点からZ軸方向へのバンドを部分的な拡張ゾーン方式で示したのが図13である。図13に示すように、入射光の真空中の波長が λ_0 の場合、フォトニック結晶内では結合性の第3バンドに対応する波数ベクトル k_{A3} のみが存在する。1次元の場合においては第3バンドによる波数ベクトルが2種類存在したが、図13の場合には $k = 1.0$ の付近に大きいバンドギャップが存在するため、波数ベクトルは1種類となる。ただし、第2バンドは非結合性である。

【0041】図13と同じ条件のフォトニック結晶について、波動の伝播(TH偏光)を有限要素法により数値計算した結果が図14である。図14は $a_y/\lambda_0 = 0.70$ の場合に、Z軸方向での電場の強さを

- : $n = 2.18$ の層の中央
- : $n = 2.18$ の層と $n = 1.44$ の層の境界
- : $n = 1.44$ の層の中央
- : ■と■の間
- : ■と■の間

について示したものである。各層では振幅が異なり、多少のノイズが見られるものの、単一周期の第3バンド光が伝播していることがわかる。従って、図12の構造では入射光を効率良く単一の第3バンド光に変換することができると言える。

【0042】分光素子などとしての使い方については「1次元端面入射構造」と同じである。1次元構造よりも構造は複雑になるが、入射光をより高い効率で利用することができる。

【0043】[計算例1] 図13に模式図を示した2次元構造について、有限要素法によるシミュレーションを行なった。設定条件は上記の通りである。Y方向の周期を具体的に $a_y = 443.1 \text{ nm}$ とした。XY平面を入射面として、真空から波長 λ_0 の平面波(TE偏光)を入射させて有限要素法によりYZ平面内の電磁波を計算した。

【0044】入射平面波の幅は $10 a_y$ 、構造体のZ軸方向の厚さは約 7000 nm であり、端面角度は 30° としてその先は真空とした。伝播方向(Z軸方向)におけるTE偏光のバンド図は図14と同じである。 $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$ の場合における第3バンドの波数ベクトルの大きさ、実効屈折率、屈折光の方向角を表1に示す。屈

折光の方向角は実効屈折率と屈折の法則から計算したものである。

【0045】

【表1】 $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$ 、 $a_y/\lambda_0 = 0.700$

Z方向の伝搬光(TE偏光)	第3バンド
波数ベクトルの大きさ	$k_3 = 0.243 \cdot 2\pi/a$
実効屈折率 $\lambda_0 \cdot k/2\pi$	0.347
屈折光の方向角	$\theta_3 = 10.3^\circ$

10

【0046】また、シミュレーション結果を図15に示す。図15より

第3バンド光: 方向角 $\theta = \text{約} 10^\circ$

であり、表1に記したバンド計算結果に近い値となった。斜め面からの出射光は、第3バンド屈折光がほとんどを占めている。ただし、構造体中でY方向に伝播する散乱光も強く出ている。これは、Z軸方向の屈折率差がY軸方向よりも大きく、光の閉じ込め効果が強いためである。表2に $\lambda_0 = 575.5 \text{ nm}$ の場合における計算結果を示す。

【0047】

【表2】 $\lambda_0 = 575.5 \text{ nm}$ 、 $a_y/\lambda_0 = 0.770$

Z方向の伝搬光(TE偏光)	第3バンド
波数ベクトルの大きさ	$k_3 = 0.551 \cdot 2\pi/a$
実効屈折率 $\lambda_0 \cdot k/2\pi$	0.716
屈折光の方向角	$\theta_3 = 9.0^\circ$

30

【0048】 $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$ と 575.5 nm の場合をバンド計算値と比較すると、入射波長の違いが第3バンド光屈折角の分散となっていることがわかる。 633 nm と 575.5 nm の波長差 $\Delta\lambda$ が 9.1% (633 nm 基準)であるのに対して、第3バンド光の方向角差は 11.0° に及んでいる。従って、 $\Delta\lambda = 1\%$ あたりの方向角差 $\Delta\theta$ は約 1.2° であり、通常のプリズムや回折格子よりも大きい分散が得られた。また、1次元の場合よりも強い第3バンド屈折光が得られているので、より効率の高い分光素子として役立てることができる。

【0049】[計算例2] 図12に模式図を示した2次元構造を図8のようにブレース加工した場合について、有限要素法によるシミュレーションを行なった。

$n_1 = 1.00$
 $n_2 = 1.00$
 $n_3 = 2.18$
 $n_4 = 1.44$
 $a_y = 810.2 \text{ nm}$
 $a_z = a_y/4$
 $t_y = 0.5$
 $t_z = 0.5$

【0050】XY平面を入射面として、真空から波長 λ_0

50

$\lambda_0 = 633 \text{ nm}$ の平面波 (TE偏光) を入射させてYZ平面内の電磁波を計算した。構造体のZ軸方向の厚さは約5000nmであり、ブレース角度 ϕ は 30° として、Y軸方向の周期1536nm (a_y の3倍) のブレース構造とした。その先は真空である。伝播方向 (Z軸方向) におけるTE偏光のバンド図は図16に示す。

【0051】 $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$ の場合における第3バンドの波数ベクトルの大きさ、実効屈折率、屈折光 (0次回折光) の方向角を表3に示す。屈折光の方向角は実効屈折率と屈折の法則から計算したものである。

【0052】

【表3】 $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$ 、 $a_y / \lambda_0 = 1.28$

Z方向の伝搬光 (TE偏光)	第3バンド
波数ベクトルの大きさ	$k_z = 1.28 \cdot 2\pi / a_y$
実効屈折率 $\lambda_0 \cdot k / 2\pi$	1.00
屈折光の方向角	$\theta_3 = 0^\circ$

【0053】 また、シミュレーション結果を図17に示す。図17より

第3バンド屈折光：方向角 $\theta = \text{約} 0^\circ$

であり、表3に記したバンド計算結果に近い値となった。図17に発生している「回折光」8は、端面に露出しているフォトニック結晶構造の周期やブレース周期により発生した次回折光である。

【0054】 入射光4の波長を変えた例として、表4に $\lambda_0 = 450 \text{ nm}$ の場合における計算結果を、図18にシミュレーション結果をそれぞれ示す。

【0055】

【表4】 $\lambda_0 = 450 \text{ nm}$ 、 $a_y / \lambda_0 = 1.138$

Z方向の伝搬光 (TE偏光)	第3バンド
波数ベクトルの大きさ	$k_z = 1.02 \cdot 2\pi / a$
実効屈折率 $\lambda_0 \cdot k / 2\pi$	0.896
屈折光の方向角	$\theta_3 = 3.4^\circ$

【0056】 図18より、出射光 (屈折光) 6の方向角 θ は約 3° であり、バンド計算値と良く一致している。

【0057】 [第3の実施形態] 第2の実施形態である「1次元端面入射2次元構造」のXY平面における構造に第1の実施形態同様の 90° 回転対称性を持たせれば、第3バンド光を強くすると共に偏光方向による差をなくすることができる。これはX、Y、Zの3方向に周期的繰り返し構造を導入することになり、3次元フォトニック結晶を用いることに相当する。光学素子としては「2次元端面入射3次元構造」となる。

【0058】 本発明に用いるフォトニック結晶の材料としては、使用波長域における透明性が確保できるものであれば特に限定はないが、一般的に多層膜の材料として用いられ、耐久性や製膜コストの点で優れたシリカ、シ

リコン、酸化チタン、酸化タンタル、酸化ニオブ、フッ化マグネシウムなどが適する材料である。ただし、材料間の屈折率差が小さいと変調作用が弱くなり、期待される作用が発揮されないこともあるので、屈折率差として0.1以上確保することが望ましい。材料を適切に選定すれば、本発明の作用は通常使用される200nm~20 μm 程度の波長範囲で発揮される。

【0059】 例えば第2の実施例で例示した構造は次のように作製することができる。ガラス基板上に真空蒸着、スパッタ、イオンアシスト蒸着、CVD法などを利用してシリカと酸化チタンの薄膜を交互に積層する。ついで膜面に垂直にストライプ状の溝を反応性イオンエッチング等の手段を用いて形成する。これによって第2の実施形態で示した構造が形成できる。3次元フォトニック結晶を作製方法は他にも種々提案されている。

【0060】

【発明の効果】 本発明によれば、2次元もしくは3次元フォトニック結晶の特定の端面から光を入射する光学素子により、偏光依存性を制御することができ、偏光依存性のない分光機能あるいは偏光分離機能を高い効率で実現できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の基礎となる光学素子の構造を示す模式図である。

【図2】 本発明の周期的多層構造体 (1次元) を示す説明図である。

【図3】 周期的多層構造体 (1次元) のフォトニックバンド計算結果の一例を示す図である。

【図4】 周期的多層構造体 (1次元) のフォトニックバンド計算結果の他の一例を示す図である。

【図5】 周期的多層構造体 (1次元) の、光の伝播方向におけるバンド図である。

【図6】 周期的多層構造体 (1次元) の、光の伝播方向における他のバンド図である。

【図7】 プリズム状に加工した周期的多層構造体 (1次元、端面入射構造) の分散作用を表わす模式図である。

【図8】 ブレース状に加工した周期的多層構造体 (1次元、端面入射構造) の分散作用を表わす模式図である。

【図9】 2種類の周期を有する周期的多層構造体 (1次元、端面入射構造) の分散作用を表わす模式図である。

【図10】 2次元端面入射構造を表わす模式図である。

【図11】 2次元端面入射構造の端面パターン例を表わす模式図である。

【図12】 1次元端面入射2次元構造を表わす模式図である。

【図13】 1次元端面入射2次元構造のフォトニックバンド図の一例である。

【図14】 1次元端面入射2次元構造の内部を伝播する電場の波動を表わす図である。

【図15】 1次元端面入射2次元プリズム構造光学素子

10

20

30

40

50

の光学特性に関する計算結果の一例を示す図である。

【図16】1次元端面入射2次元構造のフォトニックバンド図の他の一例である。

【図17】1次元端面入射2次元ブレース構造光学素子の光学特性に関する計算結果の一例を示す図である。

【図18】1次元端面入射2次元ブレース構造光学素子の光学特性に関する計算結果の他の一例を示す図である。

【図19】従来の分光装置の光学系を示す図である。

【符号の説明】

1 フォトニック結晶

1 a、1 c 光出射面

1 b 光入射面

2 基板

3 回折格子

4 入射光

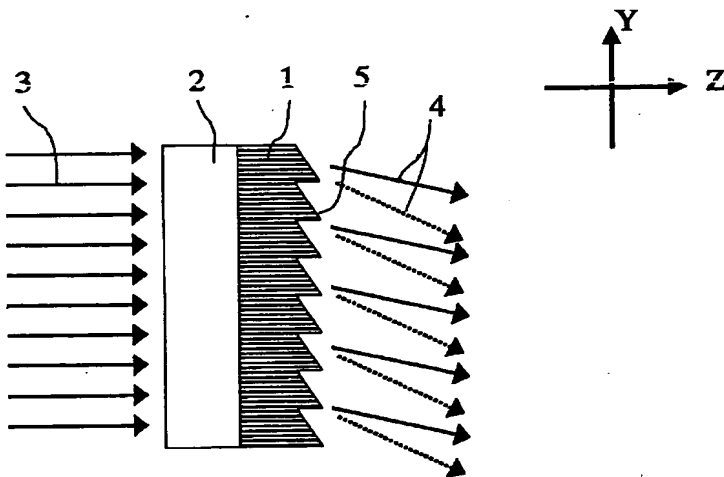
5 回折格子

6 出射光

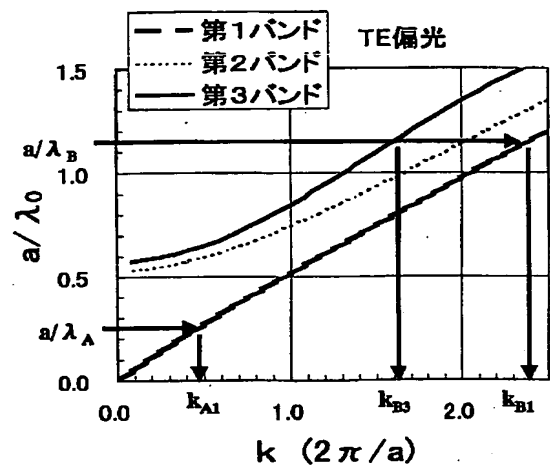
8 回折光

10

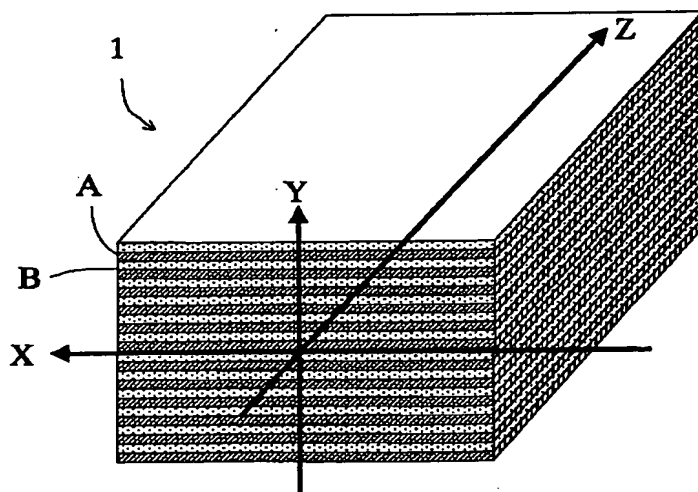
【図1】



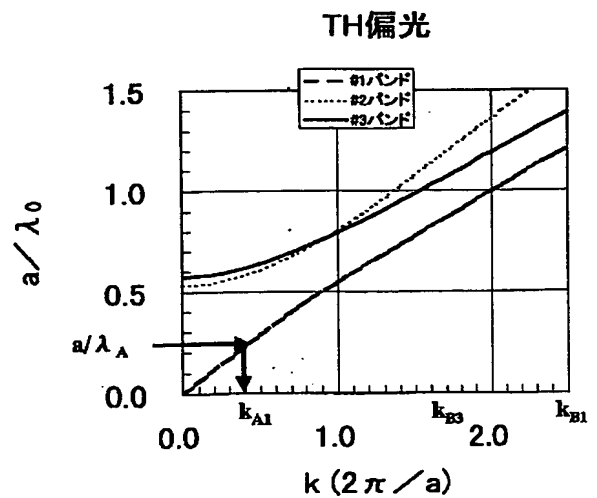
【図5】



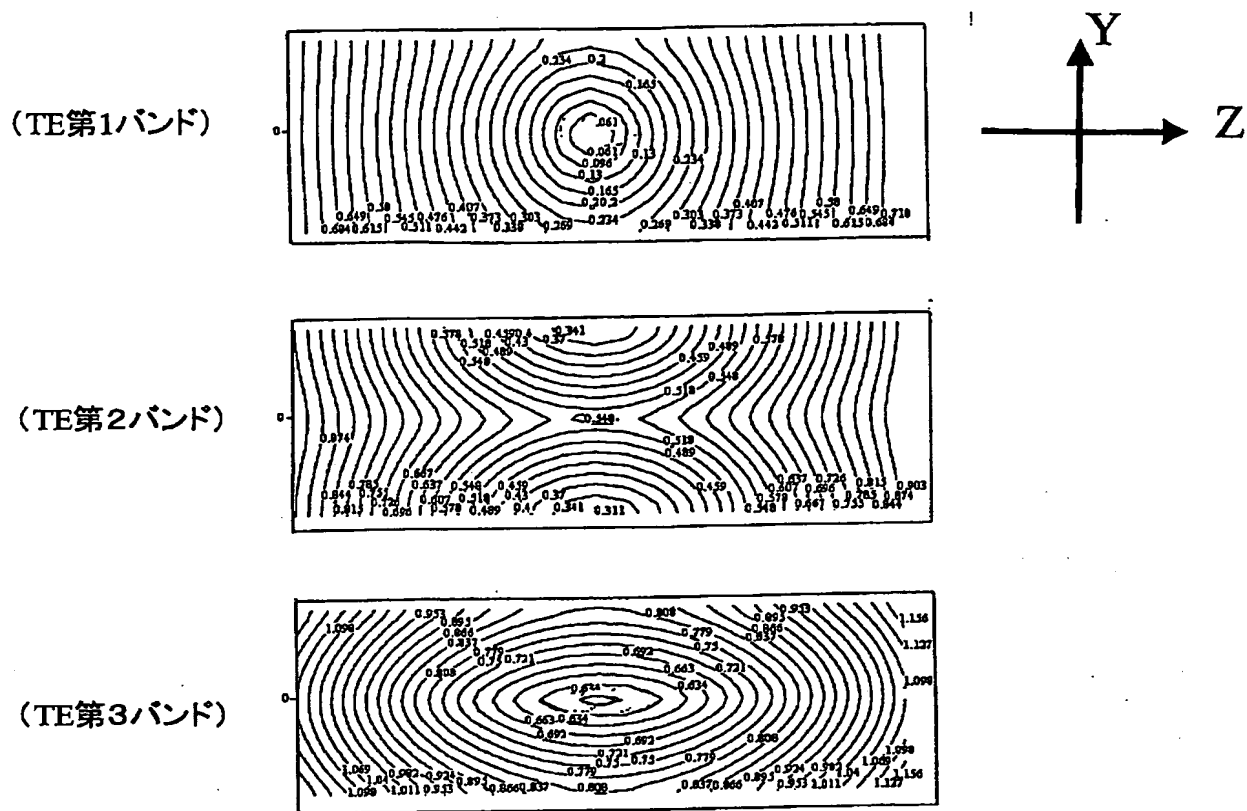
【図2】



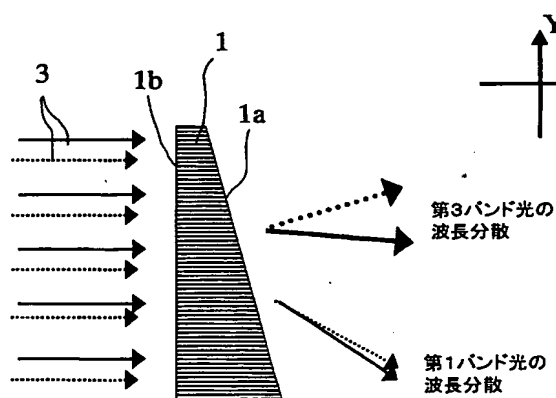
【図6】



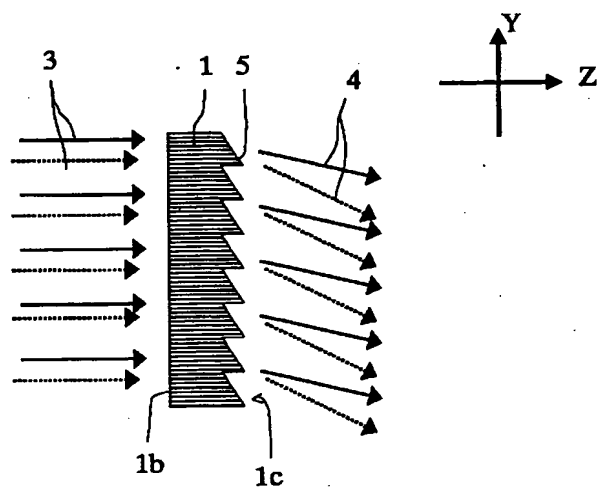
【図3】



【図7】

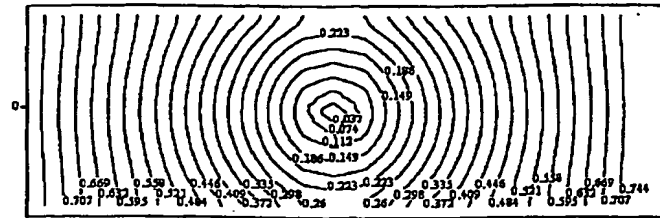


【図8】

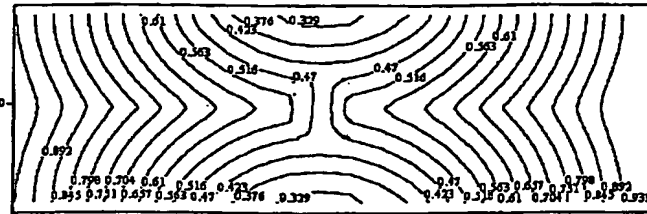


【図4】

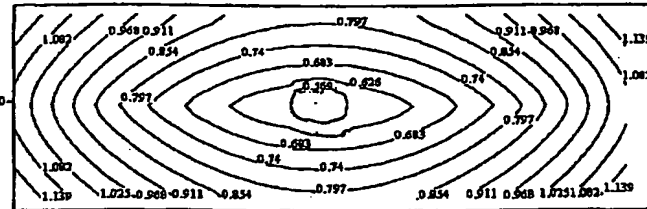
TH第1バンド



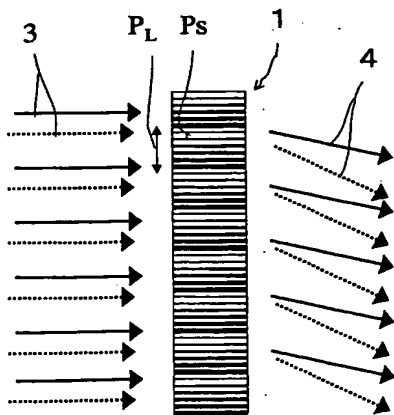
TH第2バンド
(一部第3バンド)



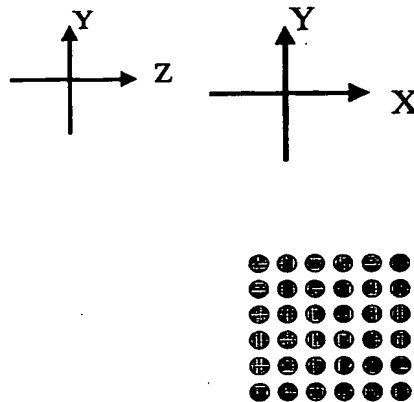
TH第3バンド
(一部第2バンド)



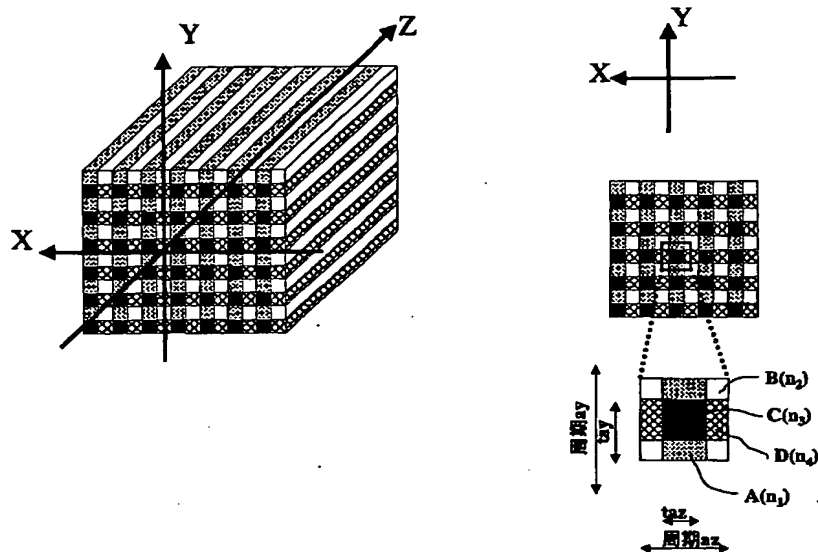
【図9】



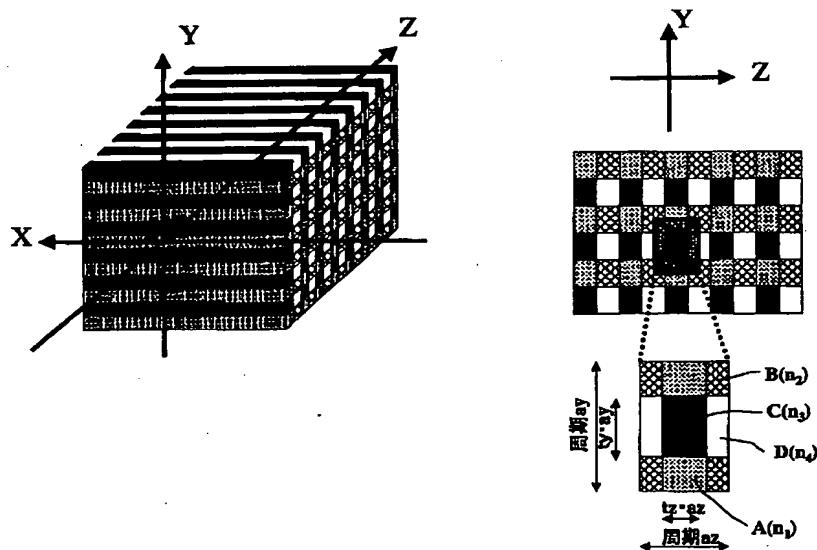
【図11】



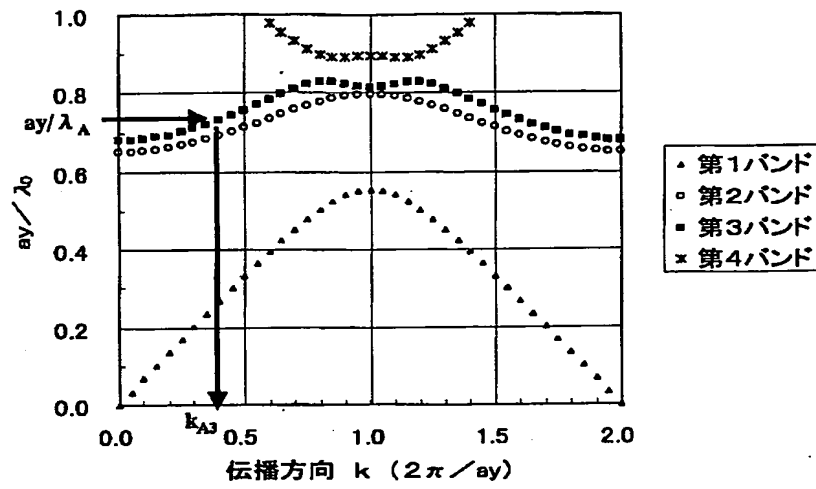
【图10】



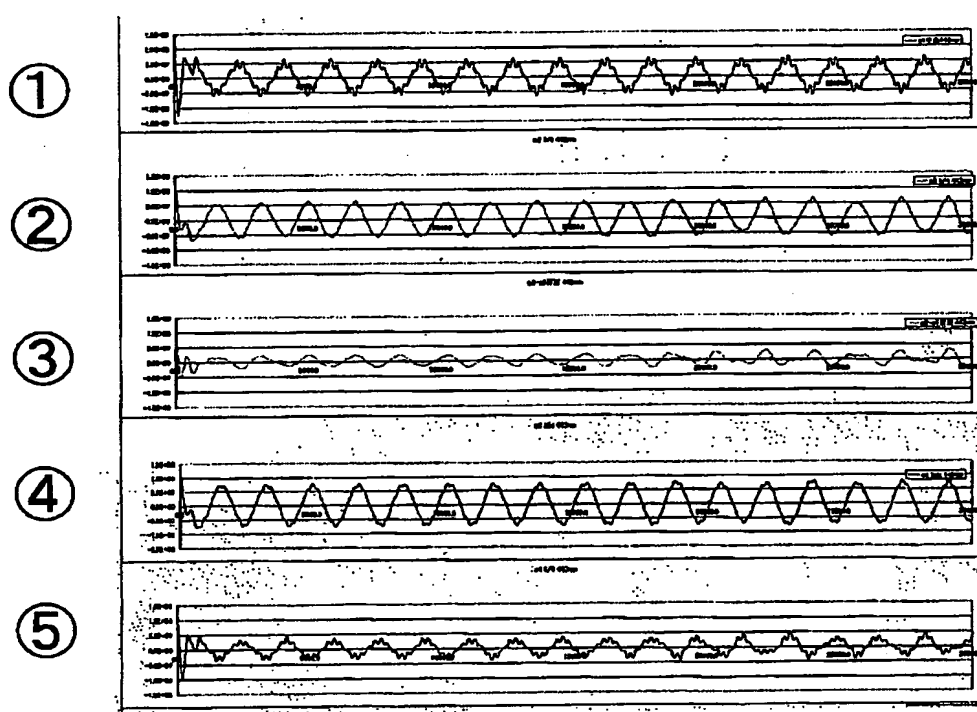
【图12】



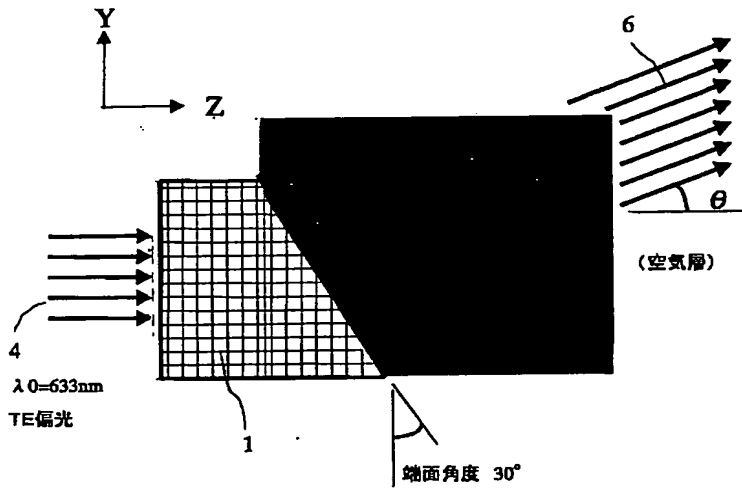
【図13】



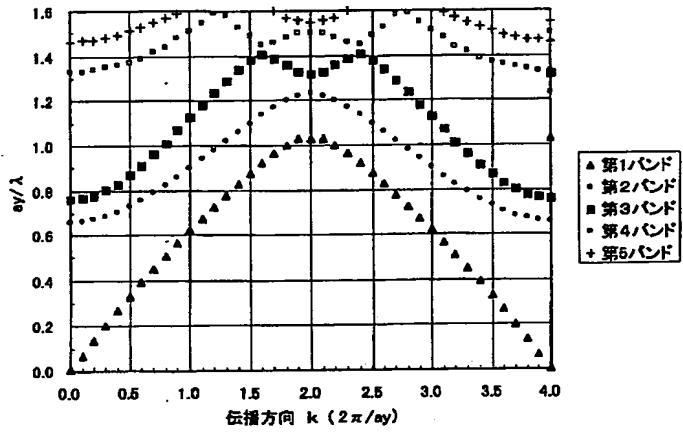
【図14】



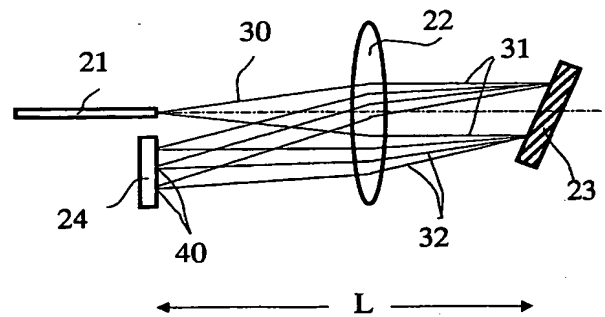
【図15】



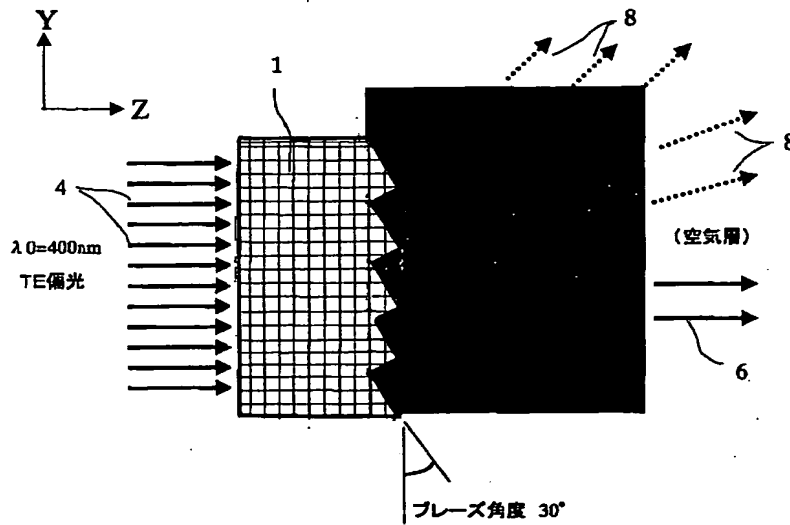
【図16】



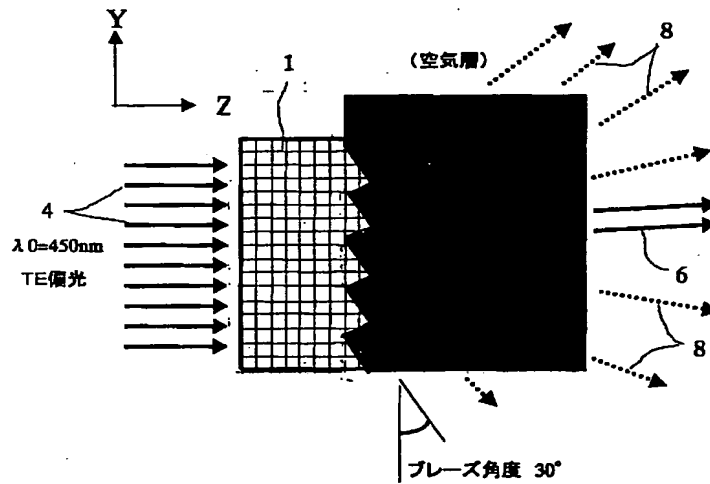
【図19】



【図17】



【図18】



【手続補正書】

【提出日】平成13年4月19日(2001.4.19)

【手続補正1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】請求項4

【補正方法】変更

【補正内容】

【請求項4】前記光入射面と光出射面がそれぞれ平面であることを特徴とする請求項1ないし3に記載の光学素

子。

【手続補正2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】請求項5

【補正方法】変更

【補正内容】

【請求項5】前記光入射面もしくは光出射面が周期的繰返し凹凸構造を有することを特徴とする請求項1ないし3に記載の光学素子。

フロントページの続き

(72)発明者 小山 正
大阪府大阪市中央区北浜4丁目7番28号
日本板硝子株式会社内

(72)発明者 浅井 貴弘
大阪府大阪市中央区北浜4丁目7番28号
日本板硝子株式会社内

Fターム(参考) 2H047 KA02 LA21 PA04 PA05 PA24
2H049 AA37 AA44 AA51 AA58 AA59
AA62 AA63 BA05 BA45 BB06
BC25

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.